

## **Підготовчі процеси збагачення**

УДК 622.73

**Е.В. ТЕРНОВАЯ,**

**Н.С. ПРЯДКО,** канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Институт технической механики НАНУ и ГКАУ)

### **КИНЕТИКА ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА ПРИ СТРУЙНОМ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ**

*Введение.* Порошкообразные материалы применяются во многих отраслях промышленности. Многие свойства порошков в значительной степени зависят от дисперсности. Анализ дисперсного состава является обязательным методом контроля во всех технологических процессах, связанных с изготовлением и переработкой порошкообразных материалов.

Прогнозирование гранулометрического состава порошков является распространенным методом исследований веществ, материалов и изделий во многих технологических процессах. Гранулометрический состав является критерием, с помощью которого можно определить качество промежуточной и готовой продукции в порошковой технологии, поэтому анализ кинетики фракционного состава является актуальным вопросом при решении проблемы прогнозирования гранулометрического состава продуктов измельчения.

*Анализ последних достижений.* Разработано несколько теоретических подходов к изучению кинетики грансостава [1, 2], где, в частности, рассмотрели объединение популяционно-балансовой модели с энергетической моделью для прогнозирования гранулометрического состава материала с учетом энергозатрат. В этих моделях в результате обобщения опытных данных говорится, что в однократном акте измельчения осколки любой фракции всегда равномерно распределяются по размерам независимо от подводимой энергии. Если данное распределение каким-то образом нарушается, то считается, что в одном нагружении происходит несколько элементарных актов измельчения. Энергозависимой считается лишь селективная функция, которая определяется из энергетического закона.

Нами рассмотрена кинетика перехода материала между фракциями смеси в мельнице при имитационном динамическом моделировании измельчения [3]. Использовалась 5-х фракционная модель материала при измельчении. Исходный материал, загружаемый в мельницу, содержит три класса, два класса образуются при измельчении материала в мельнице – контрольный и переизмельченный.

Современные теоретические исследования грансостава базируются на основной гипотезе – о независимом измельчении фракций в смеси и распределении подводимой энергии пропорционально массе фракций. Первая часть гипотезы была доказана экспериментально [4]. Однако вторая часть вызывает сомнения. В работе [5] показано, что при нагружении частиц сжатием распределение энергии существенно отличается от пропорциональной и выражается зависимостью

$$k_j = k(x_j, x_e, c_1, c_2) = (x_j / x_e)^{c_1 + c_2 \ln(x_j / x_e)}, \quad (1)$$

которая вычислялась косвенным путем и по сути является подгоночной функцией, устранивающей разногласие между экспериментальными данными и вычисленными по линейной модели. При вибрационном измельчении распределение энергии по фракциям близко к пропорциональному их массе.

Следует рассмотреть выполнение гипотезы о пропорциональности подводимой к материалу энергии массе фракций при струйном измельчении.

*Цель работы* – анализ кинетики фракционного состава материала при тонком измельчении с позиций распределения потребляемой энергии по фракциям.

*Основной материал.* При тонком измельчении состав фракции постоянно меняется. На примерах измельчения в разных мельницах [6] показана зависимость кинетики и скорости измельчения от вида мельницы, т. е. от способа разрушения, однако характер изменения скорости измельчения фракций сохраняется при всех видах измельчения: для крупных по размеру фракций – убывающий, для средних и мелких – знакопеременный. Зная скорости измельчения фракций можно определить матрицу измельчения. Если рассматривать непрерывный процесс измельчения, то обычно используется форма

$$\frac{df}{dt} = -\dot{S}f + \dot{S}Bf, \quad (2)$$

где  $\dot{S}$  – диагональная матрица;  $B$  – распределительная матрица;  $f$  – матрица гранулометрического состава материала до измельчения.

Выполнимость гипотезы о пропорциональности подводимой к материалу энергии массе фракций для тонкого измельчения вызывает сильные сомнения в свете выполнимости гипотезы Риттенгера для тонкого и сверхтонкого измельчения и установления существования критического уровня энергопотребления [7]. Для получения тонких фракций измельченного материала, меньших по массе, требуется значительно больше подводимой энергии, чем для фракций крупных частиц, имеющих большую массу. Проверим это расчетами.

Рассмотрим сыпучий материал массой  $M = 0,35$  кг, который состоит из частиц различного размера от 0 до  $x_{\max}$ . Гранулометрический состав исходного и измельчаемого материала представлен в таблице 1. Результаты анализа кинетики грансостава доменного шлака, измельченного в лабораторной струйной мельнице, представлены в таблице 2.

## Підготовчі процеси збагачення

Таблиця 1

Гранулометрический состав материала и измельченного продукта							
Продукт	Класс крупности, мм						
	2,5-1,6	1,6-1	1-0,63	0,63-0,315	0,315-0,2	0,2-0,1	0,1-0,05
Исх.	63,8	126,4	71,2	41,7	32,9	12,7	1,3
1	30,6	50,3	109,2	69,8	46,1	38,8	5,2
2	12,3	35,7	106,4	90,6	77,1	21,45	6,5
3	2,2	27,3	86,6	107,1	67,4	41,5	17,9

Таблиця 2

Кинетика струйного измельчения шамота							
$D_{min} \backslash t$ , мин	1	2	3	4	5	6	7
0,16	30,6	12,3	0	0	0	0	0
0,1	50,3	18,3	35,7	0	0	0	0
0,063	109,2	50,3	45,2	106,35	0	0	0
0,0315	69,8	109,2	109,2	83,75	90,6	0	0
0,02	46,1	69,8	69,8	69,8	169,3	77,1	0
0,01	38,8	46,1	46,1	46,1	46,1	228,9	21,45
0,005	5,2	44	44	44	44	44	328,55

Рассматриваемую порцию исходного материала разделим на  $n$  фракций по размерам частиц. Фракция  $j$  состоит из частиц, имеющих размер от  $x_j^{\min}$  до  $x_j^{\max}$  а ее масса равна  $f_j$ .

Сумма масс фракций  $M_j, j=1 \dots n$ , в полидисперсном материале представляет собой ненормированное распределение частиц по размерам

$$\sum_{i=1}^n M_j = M. \quad (3)$$

Разделив обе части уравнения (3) на  $M$  получим

$$\sum_{j=1}^n f_j = 1, \quad (4)$$

где безразмерная величина  $f_j = M_j / M$  образует нормированное распределение частиц по размерам.

Распределение частиц по размерам представим в виде матрицы-столбца:

$$f = [f_j] = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_n \end{bmatrix}. \quad (5)$$

После подведения энергии материал измельчается и соответственно изменяется распределение частиц в продукте измельчения.

$$f = \begin{bmatrix} 0,087 \\ 0,144 \\ 0,312 \\ 0,199 \\ 0,132 \\ 0,111 \\ 0,015 \end{bmatrix} \quad f' = \begin{bmatrix} 0,035 \\ 0,102 \\ 0,304 \\ 0,259 \\ 0,22 \\ 0,061 \\ 0,019 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для того чтобы установить связь между ними, необходимо ввести безразмерный коэффициент  $P_{ij}$ , который показывает относительную долю фракции  $j$  перешедшей во фракцию  $i$  измельченного материала. Данные коэффициенты образуют треугольную матрицу, которая так же носит название матрицы измельчения

$$P = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} 0,35 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,052 & 0,102 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,144 & 0,129 & 0,304 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,312 & 0,312 & 0,239 & 0,259 & 0 & 0 & 0 \\ 0,199 & 0,199 & 0,199 & 0,483 & 0,22 & 0 & 0 \\ 0,132 & 0,132 & 0,132 & 0,132 & 0,654 & 0,061 & 0 \\ 0,126 & 0,126 & 0,126 & 0,126 & 0,126 & 0,939 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Каждый коэффициент матрицы показывает вероятность перехода при измельчении случайно выбранной частицы из фракции  $j$  во фракцию  $i$ .

Столбцы рассматриваемой матрицы должны удовлетворять условиям нормировки, которые вытекают из закона сохранения массы фракции независимо от того, в какую фракцию переходят ее частицы

$$\sum_{i=j}^n p_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Если предположить, что общая энергия, подводимая к смеси фракций, распределяется между фракциями пропорционально их массе, то энергию  $E_j$ , подводимую к  $j$ -й фракции, можно определить следующим образом

$$E_j = E \frac{f_j}{M} = E_m f_j, \quad (9)$$

где  $E_m$  – удельная энергия, подводимая к исходному материалу массой. Для сравнения расчетных и экспериментальных данных вводится функция распределения энергии

$$k_j = \frac{E_{mj}}{E_m} = \frac{E_j}{f_j E_m}, \quad (10)$$

где  $E_{mj}$  – удельная энергия, подведенная к фракции  $j$ .

Для опровержения гипотезы о пропорциональном распределении энергии по фракциям, рассмотрим энергию как функцию поверхности. Для чего необходимо провести ряд расчетов.

Используем материал с тем же гранулометрическим составом. Вычисляем удельную поверхность материала

$$S = k_s \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i}{d_i},$$

где  $k_s$  – коэффициент, зависящий от свойств материала.

Учитывая выражение для математического ожидания распределения гранулометрического состава материала, получаем выражение для удельной вновь

образованной поверхности продукта в виде:  $S = k_s M \frac{1}{x}(t)$ .

Удельную энергию, подведенную к фракции  $j$ , определяем следующим образом

$$E_{mj} = \frac{(f_j - f'_j)}{f_j}, \quad (11)$$

где  $f_j$  – массовая доля фракции  $j$  до измельчения;  $f'_j$  – массовая доля фракции  $j$  после измельчения.

Зная удельную энергию, подведенную к каждой фракции, мы можем определить значение функции распределения энергии  $k_j$  и сравнить со значениями определенными ранее.

На рис. 1 показано сравнение изменения функций распределения энергии  $k_{ij}$  по фракциям, вычисленные по двум разным подходам.

Из графика видно, что распределение энергии по фракциям при учете удельной поверхности продукта измельчения происходит неравномерно, т е для фракций меньшего размера необходимо большее количество энергии, что противоречит гипотезе о пропорциональном распределении энергии по массе фракций.

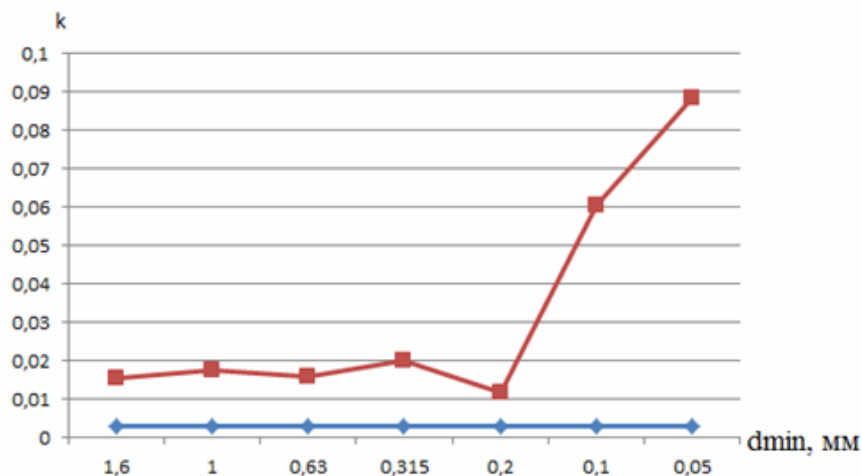


Рис. 1. Зависимость коэффициента распределения энергии от минимального диаметра частиц фракций при струйном измельчении шлама:

- ◆ – с учетом энергии пропорциональной массе фракций продукта;
- – с учетом вновь образованной поверхности измельченного продукта

### Выводы

На примере сверхтонкого измельчения шлама в струйной мельнице рассмотрена кинетика гранулометрического состава продукта измельчения с массо– энергетических позиций. Установлено, что в случае, когда принимается гипотеза о пропорциональном распределении энергии между фракциями продукта, функция распределения энергии  $k_{i,j}$  между фракциями является постоянной и ее значение не меняется в процессе измельчения. Это противоречит экспериментальным данным, ибо в ходе измельчения массовая доля фракций меняется и энергия, необходимая для их измельчения тоже меняется.

Во втором случае, для моделирования кинетики грансостава дополнительно учитывается удельная поверхность измельченного материала. Получено, что распределение энергии по фракциям изменяется в ходе измельчения и зависит от их выхода. При этом, функция распределения энергии является возрастающей, т.е. чем меньше крупность частиц, тем больше требуется энергии для их измельчения.

Однако описанные подходы к анализу фракционного состава материала довольно сложные в реализации и требуют дополнительные экспериментальные данные. Прогнозирование гранулометрического состава на их основе является довольно грубым и реализуется со значительной задержкой по времени. Поэтому необходимо использовать другой подход к контролю процесса изменения фракционного состава материала при измельчении – на основе результатов акустического мониторинга процесса.

### **Список литературы**

1. Мизонов В.Е. Некоторые закономерности селективного измельчения // Теоретические основы химической технологии. – 1984. – т. 18, № 3. – С. 410-411.
2. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия, 1989. – 160 с.
3. Прядко Н.С., Саксонова Г.М., Терновая Е.В. Имитационная модель кинетики тонкого измельчения материалов // Вестник НТУ "ХПИ". – 2014. – Вып. 53(1095). – С. 89-97.
4. Пилов П.И., Прядко Н.С., Терновая Е.В. Кинетика измельчения смеси фракций крупности // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 57(98). – С. 101-106.
5. Влияние распределения энергии по фракциям сырья на гранулометрический состав измельченного материала / Д.Е. Лебедев, В.Е. Мизонов, С.Ф. Смирнов и др. // Изв. вуз. Химия и химическая технология. – 1999. – № 1. – С. 123-134.
6. Исследование скорости измельчения руд мельницами различных типов / Н.С. Прядко, Г.А. Стрельников, Е.В. Терновая и др. // Техническая механика. – 2014. – № 3. – С. 114-121.
7. Прядко Н.С. Моделирование кинетики тонкого измельчения в помольной камере // Техническая механика. – 2014. – № 2. – С. 93-100.

© Терновая Е.В., Прядко Н.С., 2015

*Надійшла до редколегії 24.03.2015  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*